Домашнее задание №1 по электродинамике.

Задача №1.

Изучить ГОСТ 18238-72 Линии передачи сверхвысоких частот; ГОСТ 24375-80 Радиосвязь. Термины и определения.

ГОСТ 18238-72 Линии передачи сверхвысоких частот.

1. **Линия передачи сверхвысоких частот –** устройство, ограничивающее область распространения электромагнитных колебаний и направляющее поток сверхвысокочастотной электромагнитной энергии в заданном направлении.
2. **Тракт сверхвысоких частот –** совокупность сверхвысокочастотных устройств, сочлененных определенным образом.

Примечание. К сверхвысокочастотным устройствам относятся линии передачи, преобразователи сверхвысокочастотной энергии, ответвители, фильтры, вентили и т.д.

3. **Волновод –** линия передачи, имеющая одну или несколько проводящих поверхностей, с поперечным сечением в виде замкнутого проводящего контура, охватывающего область распространения электромагнитной энергии.
4. **Электрическая волна –** электромагнитная волна, вектор напряженности электрического поля которой имеет поперечную и продольную составляющие, а вектор напряженности магнитного поля лежит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения.
5. **Магнитная волна –** электромагнитная волна, вектор напряженности магнитного поля которой имеет поперечную и продольную составляющие, а вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости, перпендикулярной направлению распространения.

ГОСТ 24375-80 Радиосвязь.

1. **Радиосвязь** – электросвязь, осуществляемая посредством радиоволн.
2. **Радиоволны** – электромагнитные волны с частотами до 3 ТГц, распространяющиеся в среде без искусственных направляющих линий.
3. **Поляризация радиоволны** – характеристика радиоволны, определяющая направление вектора напряженности электрического поля.
4. **Радиопередача** – формирование и излучение радиочастотного сигнала.
5. **Антенна** – устройство, предназначенное для излучения или приема радиоволн.

Задача №2.

Положительный заряд $\boldsymbol{q}$ равномерно распределён по объёму шара радиусом $\boldsymbol{a}$. Определить напряжённость электрического поля, электрическую индукцию и скалярный потенциал внутри и вне шара. Диэлектрическая проницаемость материала $\boldsymbol{\varepsilon_{a1}}$, окружающей среды $\boldsymbol{\varepsilon_{a2}}$. Построить зависимости $E(r)$, $D(r)$,$\varphi(r)$, указать характерные особенности графиков и причину их появления.

Дано:

$a[\text{мм}] = M + 2N$

$q[\text{Кл}] = 0{,}07 \cdot N$

$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

$\varepsilon_{r1} = 2 + N/10$

$\varepsilon_{r2} = 1 + N/10$

Найти:

$E(r) - ?$

$D(r) - ?$

$\varphi(r) - ?$

Решение.

1). Вне шара поле обладает такой же симметрией, как и поле точечного заряда. Применим теорему Гаусса для вектора $\vec{D}$:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = q,$$

где S – сфера радиусом $r_1 > a$.

Сфера является эквипотенциальной поверхностью, следовательно, в каждой её точке вектор $\vec{D}$ имеет одно и то же значение и перпендикулярен ей.

$$D \cdot 4\pi r^2 = q, \Rightarrow D = \frac{q}{4\pi r^2}.$$

Вектор $\vec{D}$ имеет только нормальную составляющую.

$$D(r) = \frac{q}{4\pi r^2} \text{ для } r > a.$$

Материальное уравнение:

$$\vec{D} = \varepsilon_a \vec{E}.$$

Напряжённость электрического поля:

$$E(r) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_{a2} r^2} \text{ для } r > a.$$

2). Для нахождения поля внутри шара проведём сферу радиусом $r_2 < a$ и применим теорему Гаусса для вектора $\vec{D}$.

$$\oint_{S'} \vec{D} d\vec{S}' = q',$$

где S' – сфера радиусом r_2, q' – заряд, заключённый внутри сферы.

$$D \cdot 4\pi r_2^2 = q';$$

$$q' = \rho V';$$

$$V' = \frac{4}{3}\pi r_2^3;$$

$$\rho = \frac{q}{V} = \frac{q}{\frac{4}{3}\pi a^3},$$

где ρ – объёмная плотность заряда, V – объём поверхности.

$$D \cdot 4\pi r_2^2 = \frac{q}{\frac{4}{3}\pi a^3} \cdot \frac{4}{3}\pi r_2^3,$$

$$D = \frac{q r_2}{4\pi a^3};$$

$$D(r) = \frac{q r_2}{4\pi a^3} \text{ для } r < a.$$

Аналогично, используя приведённое выше материальное уравнение, получим

$$E(r) = \frac{qr}{4\pi\varepsilon_{a1}a^3} \text{ для } r < a.$$

3). Таким образом,

$$D(r) = \begin{cases} \frac{qr}{4\pi a^3} \quad \left[\frac{\text{Кл}}{\text{мм}^2}\right], & r < a \\ \frac{q}{4\pi r^2} \quad \left[\frac{\text{Кл}}{\text{мм}^2}\right], & r > a \end{cases} \qquad (1)$$

$$E(r) = \begin{cases} \frac{qr}{4\pi\varepsilon_{a1}a^3} \quad \left[\frac{\text{В}}{\text{мм}}\right], & r < a \\ \frac{q}{4\pi\varepsilon_{a2}r^2} \quad \left[\frac{\text{В}}{\text{мм}}\right], & r > a \end{cases} \qquad (2)$$

Найдём скалярный потенциал в точке, находящейся вне шара. По определению, потенциал в точке равен потенциальной энергии заряда в данной точке, отнесённой к величине этого заряда.

$$\varphi(r) = \frac{W_p(r)}{q_0} = \frac{\int_r^\infty F\,(r)dr}{q_0} = \frac{q_0\int_r^\infty E\,(r)dr}{q_0} = \int_r^\infty E\,(r)dr.$$

Потенциал в точке $r > a$:

$$\varphi(r) = \int_r^\infty E(r)dr = \int_r^\infty \frac{q}{4\pi\varepsilon_{a2}r^2}dr = \frac{q}{4\pi\varepsilon_{a2}r}, \qquad r > a.$$

Найдём потенциал внутри шара. Необходимо учесть, что при переходе из шара в окружающую среду происходит изменение значения вектора напряжённости.

$$\varphi(r) = \int_r^\infty E(r)dr = \int_r^a E_{\text{внутр}}(r)dr + \int_a^\infty E_{\text{внеш}}(r)dr\,;$$

$$\int_r^a \frac{qr}{4\pi\varepsilon_{a1}a^3}dr = \frac{q}{8\pi\varepsilon_{a1}a} - \frac{qr^2}{8\pi\varepsilon_{a1}a^3};$$

$$\int_a^{\infty} \frac{q}{4\pi\varepsilon_{a2} r^2} dr = \frac{q}{4\pi\varepsilon_{a2} a};$$

$$\varphi(r) = \frac{q}{8\pi\varepsilon_{a1} a}\left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) + \frac{q}{4\pi\varepsilon_{a2} a}, \qquad r < a.$$

$$\varphi(r) = \begin{cases} \dfrac{q}{8\pi\varepsilon_{a1} a}\left(1 - \dfrac{r^2}{a^2}\right) + \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_{a2} a} \quad [\text{В}], & r < a, \\ \dfrac{q}{4\pi\varepsilon_{a2} r} \quad [\text{В}], & r > a, \end{cases} \tag{3}$$

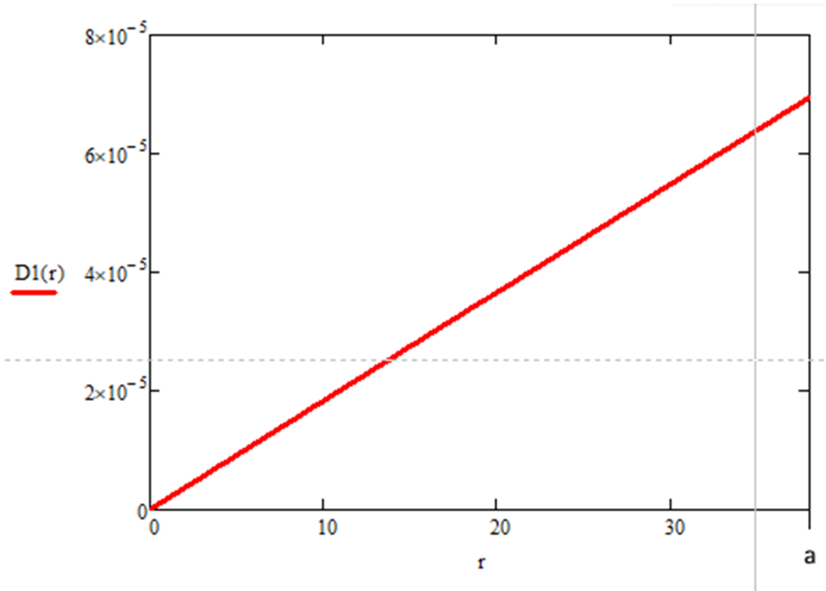
Расчёты (для варианта $M = 2$, $N = 18$).

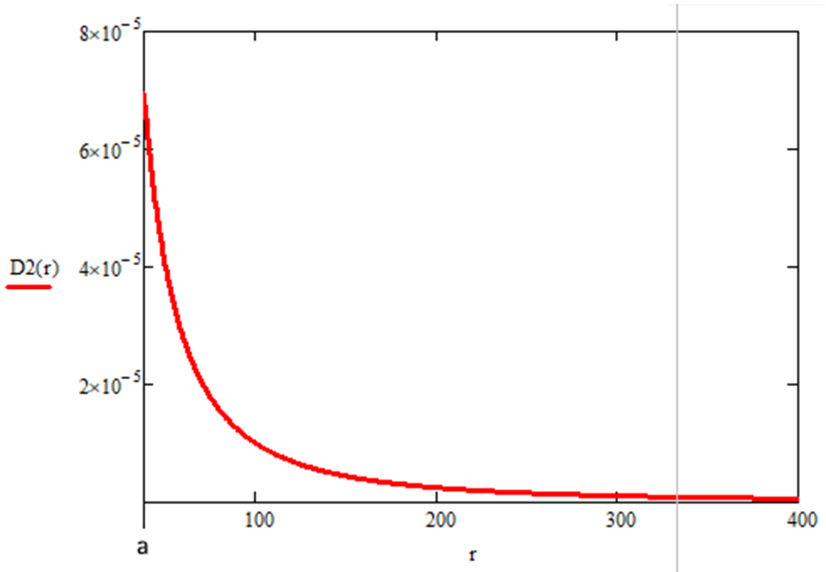
$$D(r) = \begin{cases} 1{,}827 \cdot 10^{-6} r \left[\dfrac{\text{Кл}}{\text{мм}^2}\right], & r < 38 \ [\text{мм}], \\ \dfrac{0{,}1}{r^2} \left[\dfrac{\text{Кл}}{\text{мм}^2}\right], & r > 38 \ [\text{мм}]. \end{cases}$$

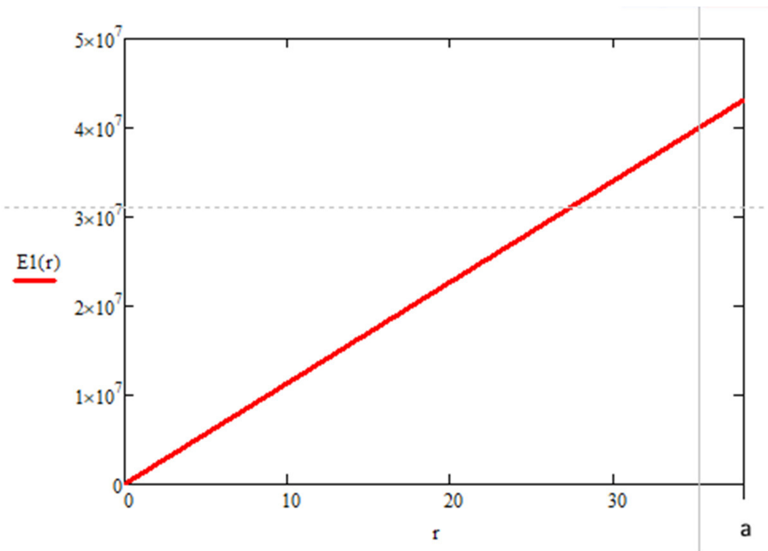
$$E(r) = \begin{cases} 1{,}134 \cdot 10^{6} r \left[\dfrac{\text{В}}{\text{мм}}\right], & r < 38 \ [\text{мм}], \\ \dfrac{6{,}26 \cdot 10^{10}}{r^2} \left[\dfrac{\text{В}}{\text{мм}}\right], & r > 38 \ [\text{мм}]. \end{cases} \tag{2}$$

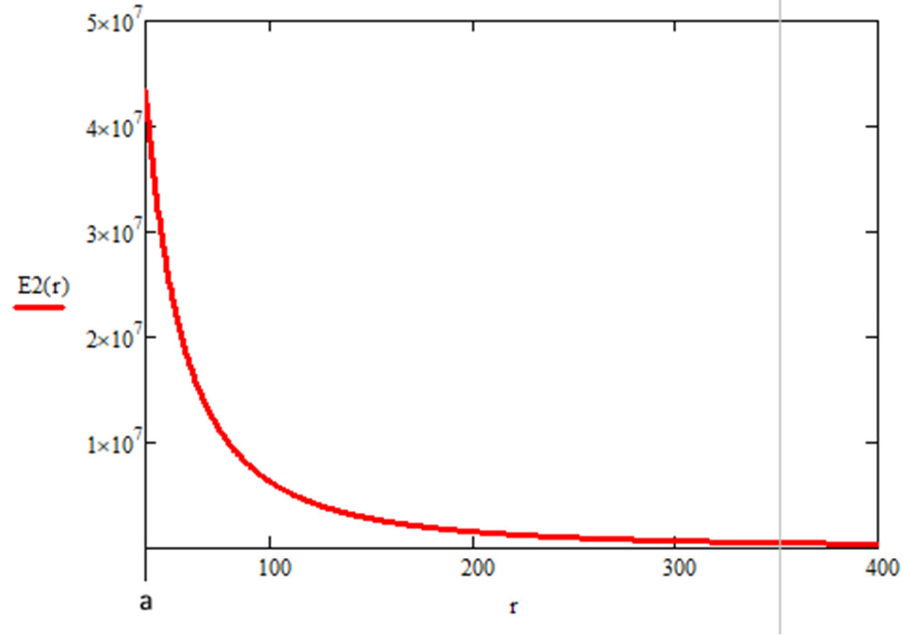
$$\varphi(r) = \begin{cases} 8{,}19 \cdot 10^{8}\left(1 - \dfrac{r^2}{1444}\right) + 1{,}647 \cdot 10^{9} \ [\text{В}], & r < 38 \ [\text{мм}], \\ \dfrac{6{,}26 \cdot 10^{10}}{r} \ [\text{В}], & r > 38 \ [\text{мм}]. \end{cases}$$

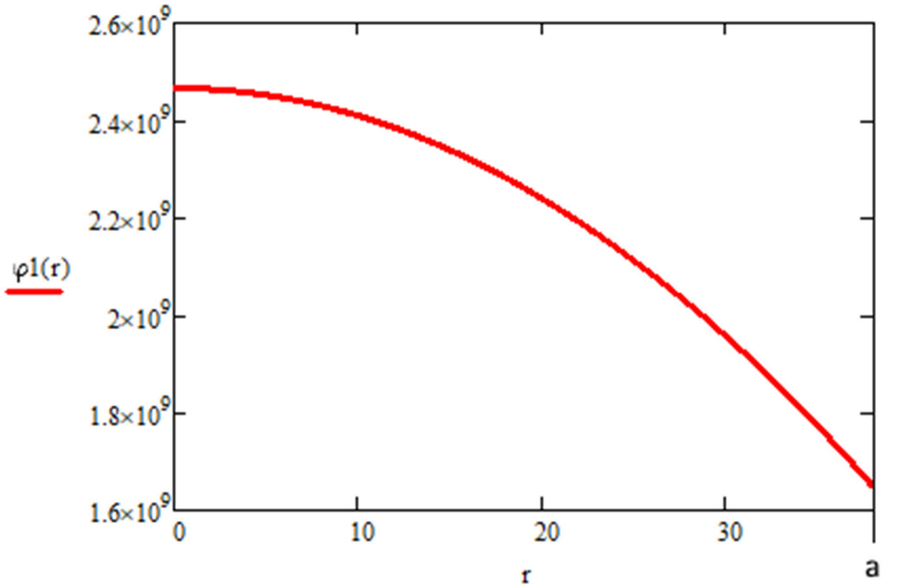
Графики.

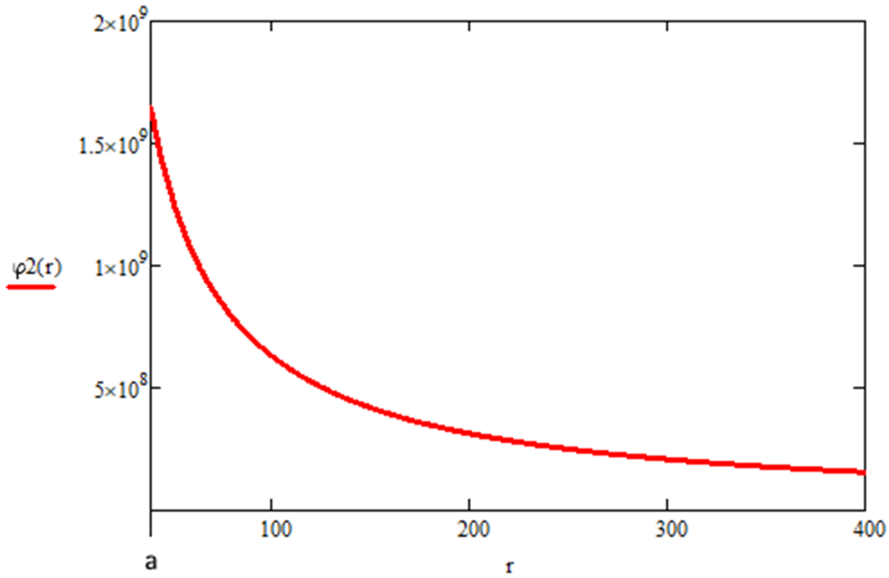

8×10⁻⁵
6×10⁻⁵
4×10⁻⁵
2×10⁻⁵
0
D1(r)
0
10
20
30
a
r


8×10⁻⁵
6×10⁻⁵
4×10⁻⁵
2×10⁻⁵
D2(r)
a
100
200
300
400
r


5×10⁷
4×10⁷
3×10⁷
2×10⁷
1×10⁷
0
E1(r)
0
10
20
30
a
r


5×10^7
4×10^7
3×10^7
2×10^7
1×10^7
E2(r)
100
200
300
400
a
r


2.6×10^9
2.4×10^9
2.2×10^9
2×10^9
1.8×10^9
1.6×10^9
φ1(r)
0
10
20
30
a
r


2×10^9
1.5×10^9
1×10^9
5×10^8
φ2(r)
100
200
300
400
a
r

Задача №3.

По бесконечно длинному цилиндрическому проводнику радиуса $\boldsymbol{a}$ протекает ток $\boldsymbol{I}$, равномерно распределённый по площади поперечного сечения. Построить зависимость напряжённости и индукции магнитного поля $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{r})$ и $\boldsymbol{B}(\boldsymbol{r})$, создаваемого этим током в однородной среде с $\boldsymbol{\mu_r = 1}$.

Дано:

$\mu_r = 1$

$I[A] = 0{,}05 \cdot N + M$

$a[\text{мм}] = 1 + 0{,}5 \cdot N$

Найти:

$B(r) - ?$

$H(r) - ?$

Решение.

1). Вне проводника магнитное поле обладает такой же симметрией, как поле бесконечного прямого проводника с током. Применим теорему о циркуляции вектора $\vec{H}$:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I,$$

где L – замкнутый контур в виде окружности радиусом $r_1 > a$.

Окружность является замкнутым контуром, в каждой точке которого вектор $\vec{H}$ сохраняет одно и то же значение и направлен по касательной.

$$H \cdot 2\pi r_1 = I, \Rightarrow H = \frac{I}{2\pi r_1}.$$

Вектор $\vec{H}$ имеет лишь тангенциальную составляющую.

Пусть магнитная проницаемость окружающей среды $\mu_{a2} = \mu_0 \mu_{r2}$.

Материальное уравнение:

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H}.$$

$$B(r) = \frac{\mu_0 \mu_{r2} I}{2\pi r}, \qquad r > a.$$

2). Для определения магнитного поля внутри проводника проведём замкнутый контур в виде окружности радиусом $r_2 < a$ и применим теорему о циркуляции вектора $\vec{H}$:

$$\oint_{L'} \vec{H} d\vec{l} = I'\,;$$

$$I' = jS';$$

$$S' = \pi r_2^2;$$

$$j = \frac{I}{S} = \frac{I}{\pi a^2},$$

где L' – замкнутый контур радиусом r_2,

I' – ток, попадающий внутрь контура,

j – плотность тока,

S' – площадь контура L'.

$$H \cdot 2\pi r_2 = \frac{I}{\pi a^2} \cdot \pi r_2^2,$$

$$H = \frac{I r_2}{2\pi a^2},$$

$$H(r) = \frac{I r_2}{2\pi a^2}, \qquad r < a.$$

Пусть магнитная проницаемость проводника $\mu_{a1} = \mu_0 \mu_{r1}$.

Аналогично, используя материальное уравнение $\vec{B} = \mu_a \vec{H}$, получим

$$B(r) = \frac{\mu_0 \mu_{r1} I r}{2\pi a^2}, \qquad r < a.$$

3). Таким образом,

$$H(r) = \begin{cases} \dfrac{Ir}{2\pi a^2}\left[\dfrac{A}{\text{мм}}\right], & r < a\ [\text{мм}], \\ \dfrac{I}{2\pi r}\left[\dfrac{A}{\text{мм}}\right], & r > a\ [\text{мм}]. \end{cases} \quad (1)$$

$$B(r) = \begin{cases} \dfrac{\mu_0 \mu_{r1} I r}{2\pi a^2}\ [\text{Тл}], & r < a\ [\text{мм}], \\ \dfrac{\mu_0 \mu_{r2} I}{2\pi r}\ [\text{Тл}], & r > a\ [\text{мм}]. \end{cases} \quad (2)$$

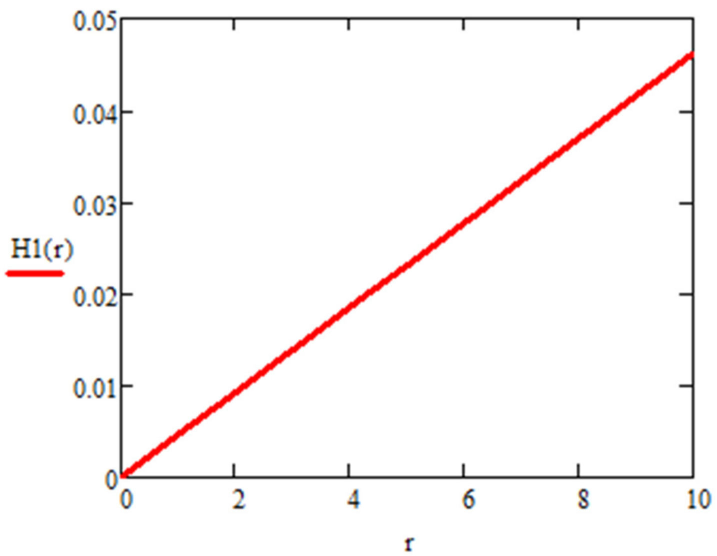
Расчёты.

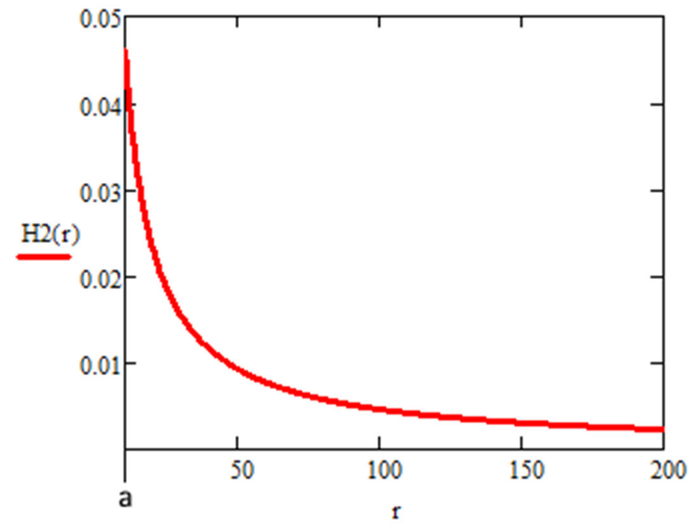
Сделаем допущение, что $\boldsymbol{\mu_r} = \boldsymbol{\mu_{r1}} = \boldsymbol{\mu_{r2}}$.

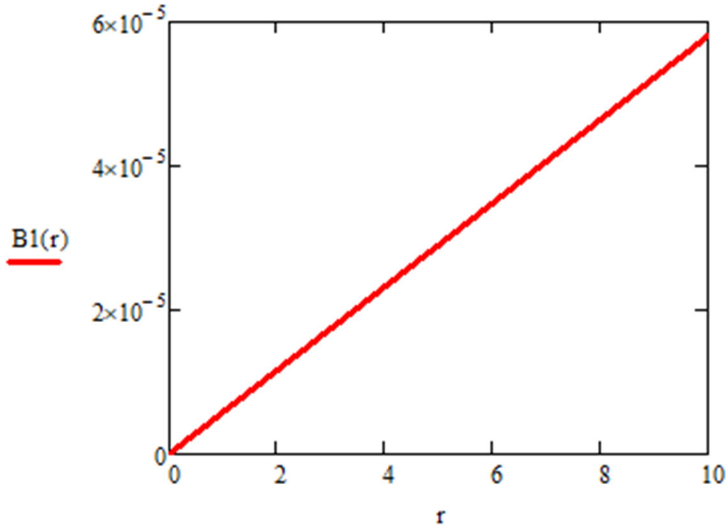
$$H(r) = \begin{cases} 0{,}0046r\left[\dfrac{A}{\text{мм}}\right], & r < 10\ [\text{мм}], \\ \dfrac{0{,}461}{r}\left[\dfrac{A}{\text{мм}}\right], & r > 10\ [\text{мм}]. \end{cases}$$

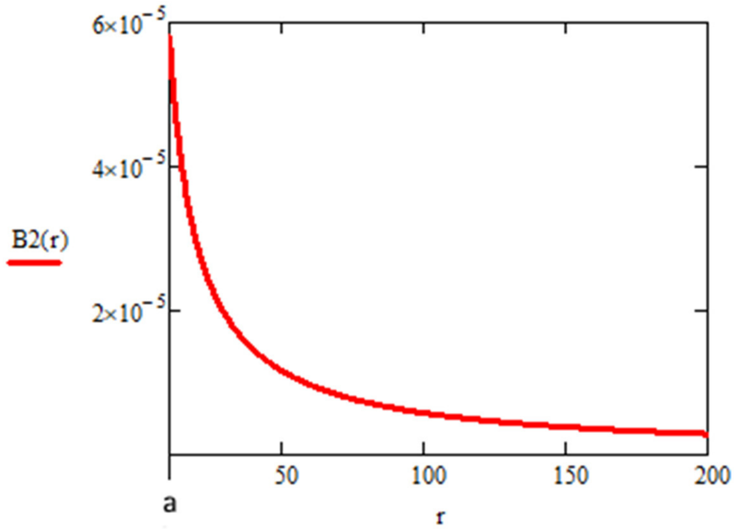
$$B(r) = \begin{cases} 5{,}8 \cdot 10^{-12}\ [\text{мкТл}] = 5{,}8 \cdot 10^{-6}\ [\text{Тл}], & r < 10\ [\text{мм}], \\ \dfrac{5{,}8 \cdot 10^{-10}}{r}\ [\text{мкТл}] = \dfrac{5{,}8 \cdot 10^{-4}}{r}\ [\text{Тл}], & r > 10\ [\text{мм}]. \end{cases}$$

Графики.




0.05
0.04
0.03
0.02
0.01
H2(r)
50
100
150
200
a
r


6×10⁻⁵
4×10⁻⁵
2×10⁻⁵
0
B1(r)
0
2
4
6
8
10
r


6×10⁻⁵
4×10⁻⁵
2×10⁻⁵
B2(r)
50
100
150
200
a
r

Задача №4.

Плоская монохроматическая линейно поляризованная электромагнитная волна распространяется в неограниченном пространстве без потерь. Диэлектрическая проницаемость среды $\boldsymbol{\varepsilon_a}$, магнитная проницаемость среды $\boldsymbol{\mu_a}$, амплитуда напряжённости электрического поля $\boldsymbol{E_m}$, частота, на которой распространяется электромагнитная волна, $\boldsymbol{f}$. Записать выражение для плоской электромагнитной волны и определить её основные параметры.

Дано:

$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

$\varepsilon_r = 2 + N/5$

$\mu_a = \mu_0 \mu_r$

$\mu_r = 1 + N/5$

$E_m \left[\frac{\text{мВ}}{\text{м}}\right] = 30 + 0{,}5N$

$f\ [\text{Гц}] = \left(M + \frac{N}{5}\right) \cdot 10^9$

Найти:

$\vec{E}(z,t), \vec{H}(z,t) - ?$

Решение.

1). Уравнения плоской монохроматической линейно поляризованной волны:

$$\vec{E} = \overrightarrow{x_0} E_m cos(wt - kz),$$

$$\vec{H} = \overrightarrow{y_0} H_m cos(wt - kz).$$

2). Циклическая частота w:

$$w = 2\pi f.$$

3). Волновое число k:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{v_{\text{ф}} T} = \frac{2\pi f}{v_{\text{ф}}} = \frac{2\pi f}{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_a \mu_a}}} = 2\pi f \sqrt{\varepsilon_a \mu_a} = w\sqrt{\varepsilon_a \mu_a},$$

где $v_{\text{ф}}$ – фазовая скорость волны.

4). Характеристическое сопротивление среды:

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}.$$

5). Амплитуда напряжённости магнитного поля:

$$H_m = \frac{E_m}{Z}.$$

6). Выражения для электромагнитной волны:

$$\begin{cases} \vec{E}(z,t) = \overrightarrow{x_0} E_m \, cos(wt - kz)\,; \\ \vec{H}(z,t) = \overrightarrow{y_0} H_m \, cos(wt - kz). \end{cases}$$

Расчёты.

$$w = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 5{,}6 \cdot 10^9 = \ 3{,}519 \cdot 10^{10} \ \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right];$$

$$\varepsilon_a = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 5{,}6 = 4{,}956 \cdot 10^{-11} \ \left[\frac{\text{Ф}}{\text{м}}\right];$$

$$\mu_a = 4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-7} \cdot 4{,}6 = 5{,}781 \cdot 10^{-6} \ \left[\frac{\text{Гн}}{\text{м}}\right];$$

$$k = 3{,}519 \cdot 10^{10} \sqrt{4{,}956 \cdot 10^{-11} \cdot 5{,}781 \cdot 10^{-6}} = 595{,}55 \ \left[\frac{\text{рад}}{\text{м}}\right];$$

$$Z = \sqrt{\frac{5{,}781 \cdot 10^{-6}}{4{,}956 \cdot 10^{-11}}} = 341{,}52 \ [\text{Ом}];$$

$$H_m = \frac{39}{341{,}52} = 0{,}114 \ \left[\frac{\text{мА}}{\text{м}}\right];$$

$$\begin{cases} \vec{E}(z,t) = \overrightarrow{x_0} \cdot 39 \cdot cos(3{,}519 \cdot 10^{10} \cdot t - 595{,}55 \cdot z) \ \left[\frac{\text{мВ}}{\text{м}}\right]; \\ \vec{H}(z,t) = \overrightarrow{y_0} \cdot 0{,}114 \cdot cos(3{,}519 \cdot 10^{10} \cdot t - 595{,}55 \cdot z) \ \left[\frac{\text{мА}}{\text{м}}\right]. \end{cases}$$

Задача №5.

В диэлектрике с параметрами $\boldsymbol{\varepsilon_a}, \boldsymbol{\mu_a}, \boldsymbol{\sigma}$ вдоль оси $\boldsymbol{z}$ распространяется электромагнитная волна, имеющая линейную поляризацию по $\boldsymbol{x}$ и частоту $\boldsymbol{f}$. Напряжённость электрического поля в точке $\boldsymbol{z = 0}$ в момент времени $\boldsymbol{t = 0}$ равна $\boldsymbol{E_m}$**.** Записать выражения для мгновенных значений электрического и магнитного поля и определить расстояние, на котором амплитуда напряжённости электрического поля уменьшится в $\boldsymbol{S}$ раз относительно начального значения.

Дано:

$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon_r$

$\varepsilon_r = \dfrac{3+N}{2}$

$\mu_a = \mu_0 \mu_r$

$\mu_r = \dfrac{M+N}{2}$

$E_m \left[\dfrac{\text{В}}{\text{м}}\right] = 0{,}05M + 0{,}3N$

$f[\text{МГц}] = \dfrac{N+5}{10}$

$S = \dfrac{N+M}{10} \cdot 10^3$

$\sigma \left[\dfrac{\text{См}}{\text{м}}\right] = 2N \cdot 10^{-2}$

Решение.

1). Уравнения электромагнитной волны в комплексном виде:

$$\dot{\overline{E}}(z,t) = \overline{x_0} E_m e^{i(wt - \dot{k}z)},$$

$$\dot{\overline{H}}(z,t) = \overline{y_0} H_m e^{i(wt - \dot{k}z)}.$$

2). Циклическая частота:

$$w = 2\pi f.$$

3). Комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости:

$$\widetilde{\varepsilon_a} = \varepsilon_a - \frac{\sigma}{w} i;$$

$$\widetilde{\mu_a} = \mu_a.$$

4). Комплексное волновое число:

$$\dot{k} = w\sqrt{\widetilde{\varepsilon_a}\widetilde{\mu_a}}.$$

5). Комплексное характеристическое сопротивление среды:

$$\dot{Z} = \sqrt{\frac{\widetilde{\mu_a}}{\widetilde{\varepsilon_a}}}.$$

6). Комплексная амплитуда вектора напряжённости магнитного поля:

$$\dot{H}_m = \frac{\dot{E}_m}{\dot{Z}}.$$

7). Выражения для мгновенных значений:

$$\overline{E}(z,t) = Re\left\{\dot{\overline{E}}(z,t)\right\},$$

$$\overline{H}(z,t) = Re\left\{\dot{\overline{H}}(z,t)\right\}.$$

Расчёты.

$$w = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 2{,}3 \cdot 10^6 = 1{,}445 \cdot 10^7 \ \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right];$$

$$\widetilde{\varepsilon_a} = 9{,}293 \cdot 10^{-11} - 0{,}25 \cdot 10^{-7} i \ \left[\frac{\Phi}{\text{м}}\right];$$

$$\widetilde{\mu_a} = 1{,}257 \cdot 10^{-5} \ \left[\frac{\text{Гн}}{\text{м}}\right];$$

$$\dot{k} = 1{,}445 \cdot 10^7 \sqrt{(9{,}293 \cdot 10^{-11} - 0{,}25 \cdot 10^{-7} i) \cdot 1{,}257 \cdot 10^{-5}} =$$

$$= 5{,}728 - 5{,}707i \ \left[\frac{\text{рад}}{\text{м}}\right];$$

$$\dot{Z} = 15{,}911 + 15{,}852i = 22{,}46\, e^{i44{,}9^\circ}\ [\text{Ом}] = \ 22{,}46\, e^{i \cdot 0{,}783 (\text{рад})}\ [\text{Ом}];$$

$$\dot{H}_m = \frac{5{,}5}{15{,}911 + 15{,}852i} = 0{,}1735 - 0{,}1728i = 0{,}244\, e^{-i44{,}9^\circ} \ \left[\frac{A}{\text{м}}\right];$$

$$\dot{\overline{E}}(z,t) = \overline{x_0} \cdot 5{,}5 \cdot e^{i(1{,}445\cdot 10^7 t - 5{,}728 z + 5{,}707 i z)} =$$

$$= \overline{x_0} \cdot 5{,}5 \cdot e^{-5{,}707 z} e^{i 1{,}445\cdot 10^7 t} e^{-i 5{,}728\cdot z} \ \left[\frac{\text{В}}{\text{м}}\right];$$

$$\alpha = 5{,}707 \ \left[\frac{\text{рад}}{\text{м}}\right];$$

$$\beta = 5{,}728 \ \left[\frac{\text{рад}}{\text{м}}\right];$$

$$\dot{\overline{H}}(z,t) = \overline{y_0} \cdot 0{,}244 \cdot e^{-i 44{,}9^\circ} e^{-5{,}707 z} e^{i 1{,}445\cdot 10^7 t} e^{-i 5{,}728\cdot z} \ \left[\frac{A}{\text{м}}\right];$$

$$\vec{E}(z,t) = \overline{x_0} \cdot 5{,}5 \cdot e^{-5{,}707 z} cos(1{,}445 \cdot 10^7 t - i 5{,}728 \cdot z) \ \left[\frac{\text{В}}{\text{м}}\right];$$

$$\vec{H}(z,t) = \overline{y_0} \cdot 0{,}244 \cdot e^{-5{,}707 z} cos(1{,}445 \cdot 10^7 t - i 5{,}728 \cdot z - 0{,}783) \ \left[\frac{A}{\text{м}}\right].$$

Комплексная амплитуда напряжённости электрического поля:

$$\dot{\overline{E}} = 5{,}5 \cdot e^{-5{,}707 z}.$$

Напряжённость электрического поля в начальный момент времени $t = 0$ в точке $z = 0$:

$$E(0{,}0) = 5{,}5 \ \left[\frac{\text{В}}{\text{м}}\right].$$

Значение в точке, где напряжённость уменьшается в S раз относительно начального значения:

$$E_x = \frac{E_m}{S} = \frac{5{,}5}{2000} = 275 \cdot 10^{-5} \ \left[\frac{\text{В}}{\text{м}}\right].$$

Координата z, в которой напряжённость уменьшится в S раз:

$$E_m e^{-5{,}707 z} = \frac{E_m}{S} \Rightarrow z = \frac{ln(S)}{5{,}707} = 1{,}33 \ [\text{м}].$$